

3次元環境モデル構築のための 全方位画像からのモデル形状に適合したテクスチャ生成

Texture Generation Suitable for the Shape of a Model from Omni-Directional Images
for 3-D Environment Model Construction

纈纈理志[†], 川西亮輔[†], 山下淳[†], 金子透[†]

Tadashi KOKETSU[†], Ryosuke KAWANISHI[†], Atsushi YAMASHITA[†]
and Toru KANEKO[†]

[†]: 静岡大学工学部, {f0930028, f5945016, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

概要 本論文では全方位画像列を用いて周囲環境のモデルを構築する手法を提案する。カメラの移動前後で取得した2画像間における対応点情報を用い、Structure from Motionによる周囲環境の計測を行う。計測点群から構築した三角網にテクスチャマッピングを施すことで環境モデルを生成する。しかし、全方位カメラから得られる画像は大きな歪みが存在するため、通常のカメラと同様なテクスチャの求め方では環境モデルに歪みが生じてしまう。本論文では全方位画像の歪みを考慮に入れたテクスチャを生成することでこの問題を解決した。

1 序論

本論文では、全方位カメラ搭載移動ロボットによる3次元環境モデリング手法を提案する。

環境地図は、移動ロボットの自己位置同定や経路計画などに必要不可欠な情報である。よって未知環境で作業を行う、移動ロボット自身が環境地図を生成することが重要となる。

地図生成には、レーザレンジファインダを用いる手法や、カメラを用いる手法がある。カメラを用いた地図生成では、物体までの距離を計測できると同時に物体表面のテクスチャを取得できることが大きな利点の1つである。その際、通常のカメラと比較して視野が広い全方位カメラを利用することが有効である[1]。

全方位カメラを用いた計測手法として、複数の全方位カメラによりステレオ計測を行う手法[2][3]がある。一般にステレオ計測の精度はカメラ間の距離(基線長)に依存しており、基線長が長いほど精度が良い。しかし、この手法ではロボットの大きさより基線長を長くできないため、計測精度に限界がある。これに対して、1台のカメラを移動させることによ

り移動前後の画像からステレオ計測を行うモーションステレオ法が提案されている。移動ロボットにカメラを搭載する場合、ロボットの移動距離が基線長となるため、移動距離を調節することにより計測対象が遠距離に存在する場合にも対応できる。

ただしこの手法を用いるためには、ロボットの移動前後、すなわちのカメラ間の相対的な位置姿勢情報が必要となる。移動による位置姿勢変化をデッドレコニングにより推定することが考えられるが、デッドレコニングは走行距離が長くなるに従い誤差が蓄積することが知られており精度の良い計測は望めない。また、GPSを用いて位置を推定する方法[4]があるが、屋内の計測には向かない。これに対する手法として、画像情報のみからロボットの移動前後の相対的な位置姿勢を推定する手法が提案されている。この手法はStructure from Motion(SFM)と呼ばれ、カメラ以外のセンサ情報を必要とせずに周囲環境の計測が可能である。

以上のことから、本手法では、1台の全方位カメラをロボットに設置し、ロボットの移動前後の2画像間で対応する特徴点の画像座標の関係からロボッ

トの相対的な位置姿勢を推定し、周囲環境の計測を行う。得られた計測点群から三角網を構築し、三角網に周囲環境のテクスチャマッピングを行うことで、色情報を持つ環境モデルを生成する。全方位カメラを用いた SFM に基づく環境モデル構築手法はすでに提案されているが [5]、この手法では、テクスチャマッピングを行う際に、全方位画像の歪みを考慮していないために、歪んだテクスチャを持つ環境モデルを生成している。そこで、本手法ではテクスチャマッピングを行う際に全方位画像の歪みを考慮に入れたテクスチャを生成することでより実環境に即した環境モデルを構築する。

2 処理の概要

本手法で用いる全方位カメラは、ビデオカメラに双曲面ミラーを取り付けたものである。この全方位カメラを搭載した移動ロボットを使用する（図 3.3 左）。移動ロボットを環境中で走行させ、走行中に撮影した動画像（図 3.3 右）を用いて計測を行う。

本手法の処理手順を図 2 に示す。まず動画像を取得する。最初の画像中から特徴点を抽出し、以後のフレームで追跡を行う。追跡された特徴点は画像間の対応点とみなすことができる。取得した対応点から光線ベクトルを算出し、その情報からカメラの位置姿勢推定を行う。対応点の 3 次元座標を算出し、以上の処理を各観測点間で繰り返す。計測点群から三角網を構築し、三角網の各面に取得した全方位画像から切り出した全方位画像の歪みを考慮したテクスチャを貼り付けることで、3 次元環境モデルが生成される。

3 環境計測

3.1 対応点抽出

ロボットの移動前後の 2 画像間における対応点を取得するため、移動前の画像から特徴点を抽出、移動後の画像まで追跡する（図 3）。本手法では、Lucas Kanade Tracker と画像をピラミッド構造化して探索する手法を組み合わせた特徴点追跡手法 [6] を用いる。

3.2 光線ベクトルの算出

カメラから 3 次元空間中の点に向かう光線を光線ベクトル $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ とする。ここで T は転置を

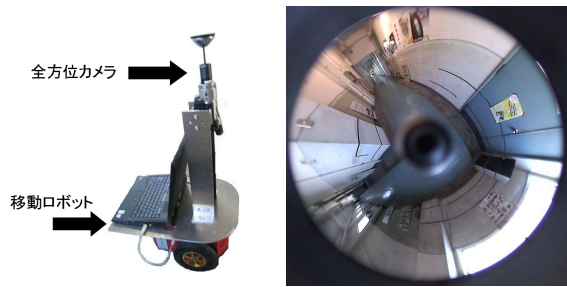


図 1: 装置構成（左：全方位カメラ搭載移動ロボット，右：取得した全方位画像）

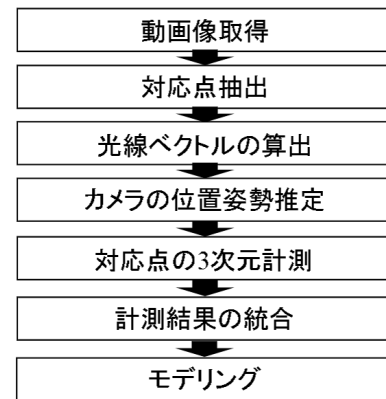


図 2: 処理手順

表す。本手法で用いる全方位カメラはカメラ前方に双曲面ミラーを装着したものであり、この光線ベクトル $\mathbf{r}$ は、双曲面のミラー側の焦点から 3 次元空間中の点へ向かう光線が双曲面上で反射する点へのベクトルで表せる（図 4）。全方位画像の座標を $[u, v]$ とすると、光線ベクトル $\mathbf{r}$ は (1), (2) 式により表される。

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} su \\ sv \\ sf - 2c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$s = \frac{a^2 \left(f\sqrt{a^2 + b^2} + b\sqrt{u^2 + v^2 + f^2} \right)}{a^2 f^2 - b^2(u^2 + v^2)} \quad (2)$$

ここで a, b, c は双曲面のパラメータであり、 f はレンズの焦点距離である。

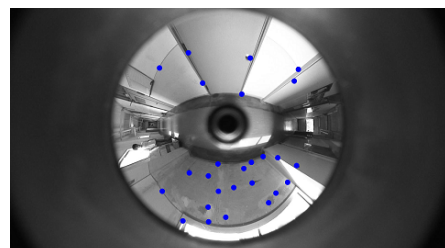


図 3: 特徴点抽出

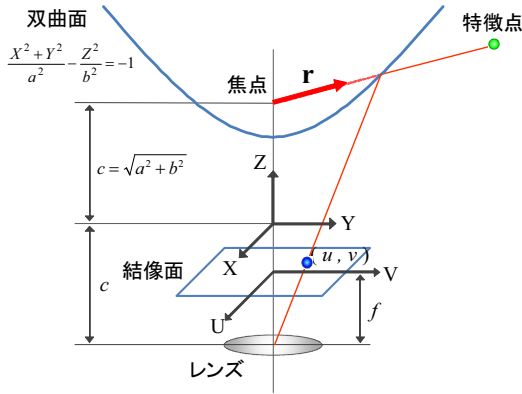


図 4: 光線ベクトルの算出

3.3 特徴点フローモデルによる位置姿勢推定

本手法では全方位カメラの回転運動と並進運動における特徴点の動きの違いを利用して、カメラの回転運動および並進運動を分離する非線形推定手法 [5] を適用する。カメラの移動前後の画像から得られる光線ベクトル $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ とカメラの並進移動ベクトル $\mathbf{t}$ 、カメラの回転運動の中心軸および角度変位量との関係を考える。このとき、ある単位球を仮定する。光線ベクトルと並進移動ベクトルは単位球の中心を始点とする単位ベクトルとし、回転軸は単位球の中心を通るものとする (図 5)。

カメラが 3 次元運動を行う場合、移動前後の光線ベクトル $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ の関係はカメラの並進移動ベクトル $\mathbf{t}$ とカメラの回転運動を記述する回転行列 $\mathbf{R}$ の 2 つの変位の組み合わせで記述できる。この仮定において 2 つの変位はそれぞれ独立であるため、カメラの回転運動による変位成分を取り除くと、カメラが並進運動のみを行う場合と同様に扱える。ここで、移動前後の 2 つの光線ベクトルからなる平面の法線ベクトルと並進移動ベクトルが垂直であることより、以下の式が成り立つ ((3) 式)。

$$(\mathbf{r}_1 \times \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (3)$$

(3) 式を満たす解は 4 つ存在する。4 つの解とは、並進移動ベクトルの正負 ($\mathbf{t}$ と $-\mathbf{t}$) と、正しいカメラ運動の回転行列とそこから並進ベクトルを軸としてさらに 180 度回転した回転行列との組み合わせである。そこで以下に述べる 2 つの拘束条件によって解を絞り込む。

1 つ目の拘束条件は、光線ベクトルの変位が並進移動ベクトルの端点 (以降、正極と呼ぶ) から離れ

る方向で、かつ並進移動ベクトルと正負反対の成分をもつベクトルの端点 (以降、負極と呼ぶ) に集まる方向になることである。これにより並進ベクトルの向きが決まる。もう 1 つの拘束条件は、それぞれの光線ベクトルが移動前後の変位で正極、負極をまたがないことである。これにより正しい回転行列が決まる。回転行列、並進ベクトルが前述の 2 つの拘束条件を満たすとき、提案モデルにおいて幾何学的に以下の式を満たす ((4) 式)。

$$\mathbf{q}_1 \cdot \mathbf{q}_2 < 0 \quad \cap \quad \mathbf{q}'_1 \cdot \mathbf{q}'_2 < 0 \quad (4)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1 &= \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1, \quad \mathbf{q}_2 = \mathbf{t} - \mathbf{r}_1, \\ \mathbf{q}'_1 &= -\mathbf{q}_1, \quad \mathbf{q}'_2 = -\mathbf{t} - \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_2 \end{aligned}$$

である。これはすなわち、 $\mathbf{q}_1$ と $\mathbf{q}_2$ のなす角、 $\mathbf{q}'_1$ と $\mathbf{q}'_2$ のなす角がともに鈍角となるときである (図 6)。すべての光線ベクトルの組 $\mathbf{r}_{1,i}, \mathbf{r}_{2,i}$ に対して (3), (4) 式を満たすような回転行列および並進ベクトルを求める。具体的には以下の評価式における E を最小化する ((5), (6) 式)。

$$e_i = \begin{cases} |(\mathbf{r}_1 \times \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{t}| & \text{if (4) is satisfied} \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$E = \sum_i e_i \quad (6)$$

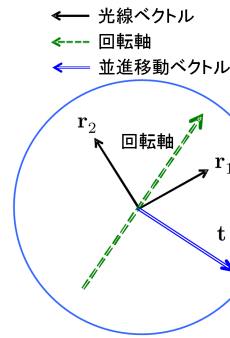


図 5: 特徴点フローモデル

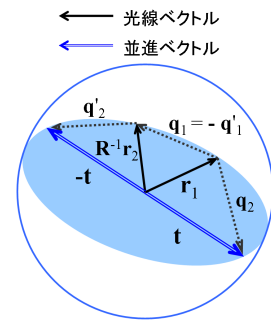


図 6: 拘束条件

3.4 対応点の 3 次元計測

ある観測点間 m において推定された回転行列 $\mathbf{R}_m$ と並進移動ベクトル $\mathbf{t}_m$ を用いて、対応点の 3 次元計測を行う。移動前後のそれぞれの観測点のカメラ位置から特徴点へ向かう光線ベクトル $\mathbf{r}_{1,m,i}, \mathbf{r}_{2,m,i}$ の交わる点が計測結果 $\mathbf{p}_{m,i}$ となる。ただし、実際は誤差の影響で 2 つの光線ベクトルは交わらないため、その最短距離の中点を計測結果とする。

3.5 計測結果の統合

提案手法では計測結果のスケール情報が不明である．したがって異なる観測点間の計測結果を合成するには，それぞれの計測結果のスケールを合わせる必要がある．そこで，隣り合った観測点間で同じ特徴点が計測されることを利用し，その3次元座標の誤差の二乗和を最小にするようにスケールを合わせる．

4 モデリング

4.1 三角網の生成

得られた計測点群から3次元のドロネー分割により三角網を構築する．しかし，ドロネー分割によって得られる多面体構造は計測対象の形状を考慮していないため，物理的な辺に矛盾する三角網が生成されることがある．そこで提案手法では，矛盾を検出するテンプレートを導入して三角網を物理的な形状に適合するように最適化する手法[7]を適用する．これにより実際の環境と矛盾しないモデルを生成することができる．

4.2 全方位画像の歪みを考慮したテクスチャの生成

通常のカメラでテクスチャを求める際には，(図7(a))のように三角網の3つの頂点を画像に投影し，その投影点を頂点とする三角形をテクスチャとすれば良い[8][9]．しかし，全方位画像からこのような方法でテクスチャを求めると，図8(a)のような三角網に対して，図8(b)のように歪んだテクスチャが算出される．

そこで提案手法では3つの頂点とする三角形の面を現実での平面と仮定し，頂点だけでなく三角形の辺や内部の点も全方位画像に投影する(図7(b))．

提案手法ではテクスチャをデータ圧縮のため直角二等辺三角形の画像に保存する．直角二等辺三角形の大きさを求めるために三角網の3つの頂点を全方位画像に投影する．その投影点を頂点とする三角形の面積から，直角二等辺三角形の最適な1辺の長さ n を決める．サイズの求まったテクスチャ画像から仮定した三角形へのアフィン変換を行うためのパラメータを求め，テクスチャ画像の座標 $[u', v']$ を仮定した三角形に対応付ける(図9)．図9ではテクス

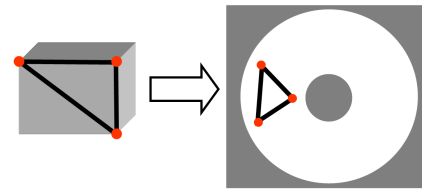
チャ画像の左下の座標が P_1 ，右下の座標が P_2 ，左上の座標が P_3 とそれぞれ対応している．

ここで，原点から3つの頂点に向かうベクトルを P_1, P_2, P_3 とし， P_1 から P_2 へ向かうベクトルを v_1 ， P_3 を通り v_1 に垂直に交わるベクトルを v_2 とする．すると，原点から対応付けた点へのベクトル X は(7)，(8)，(9)式のように表すことができる．

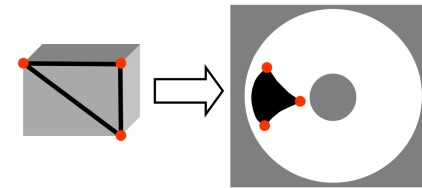
$$X = P_1 + \alpha v_1 + \beta v_2 \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{i}{n} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$\beta = \frac{j}{n} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$



(a) 歪みを考慮しない場合



(b) 歪みを考慮した場合

図 7: 歪みを考慮したテクスチャ算出



(a) 実環境



(b) 歪みを考慮していないテクスチャ



(c) 歪みを考慮したテクスチャ

図 8: 全方位画像の歪みの影響

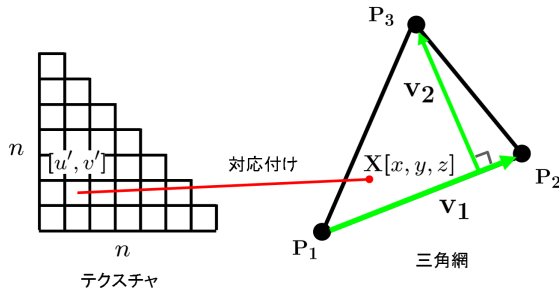


図 9: テクスチャ算出

対応付けた点の座標 $[x, y, z]$ を全方位画像に投影し、投影点 $[u, v]$ の画素値をテクスチャの座標 $[u', v']$ の画素値として求める ((10), (11), (12) 式)。

$$u = \frac{f s_p x}{2c + s_p z} \quad (10)$$

$$v = \frac{f s_p y}{2c + s_p z} \quad (11)$$

$$s_p = \frac{a^2 \left(z \sqrt{a^2 + b^2} + b \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)}{b^2 (x^2 + y^2) - a^2 z^2} \quad (12)$$

三角形の辺や面内部の点も投影することで全方位画像の歪みを低減したテクスチャが得られる (図 8(c))。

5 実験

屋内環境 (L 字廊下 (図 10)) で計測を行った。全方位カメラを搭載した移動ロボットを約 10cm/s の速度で走行させながら撮影を行い、フレームレートは 10fps とした。入力画像のサイズは 1920×1080pixels である。

提案手法により得られた廊下の 3 次元環境モデルを図 11 に示す。この図は図 10 と同じ視点から見たものである。図から、廊下形状や物体の配置が正しく復元されていることが分かるが、壁を見ると、若干の歪みの見える結果となった。これは計測誤差の影響で壁などの平面のモデルが凹凸のある形状となっていることが原因である。

また、全方位画像の歪みを考慮していないテクスチャを用いた場合の環境モデルと本論文で提案した全方位画像の歪みを考慮したテクスチャを用いた場合の環境モデルを図 12 に示し、その 1 部分を拡大した図を図 13 に示す。



図 10: 実験環境



図 11: 3 次元環境モデル

図 13(a) 左を見ると、全方位画像の歪みを考慮していないモデルではパネルに大きな歪みが存在する。それに対して、図 13(b) 左の全方位画像の歪みを考慮したモデルではその歪みが低減されている。

また、図 13(a)(b) 右の右上部パネルを比較すれば分かるように、環境モデルの上側、つまり全方位画像の円周部をテクスチャとして使用する場所の歪みが大きく低減されている。これは全方位画像の円周部は、全方位画像の歪みが大きいためであると考えられる。

6 結論

本論文では、全方位カメラによる 3 次元環境モデルの構築において、全方位画像の歪みを考慮に入れたテクスチャの生成手法を提案した。その結果、より実環境に即した環境モデルが構築され提案手法の有効性が示された。

しかし、場所によっては実環境に矛盾のある三角網が残る場合があり、その影響により環境モデルに未だに歪みが存在することがある。矛盾のある三角網が生成される原因は計測誤差の影響と複雑形状の



(a) 全方位画像の歪み考慮なし

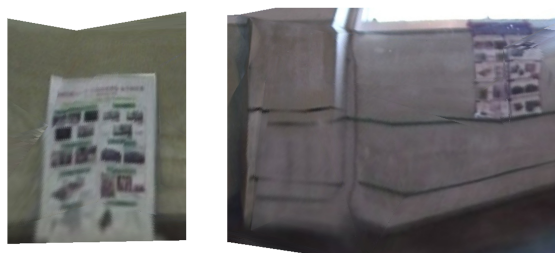


(b) 全方位画像の歪み考慮あり

図 12: 廊下の環境モデル



(a) 全方位画像の歪み考慮なし



(b) 全方位画像の歪み考慮あり

図 13: 廊下の環境モデルの拡大図 (左: 視点 1, 右: 視点 2)

計測物体や曲面形状の計測物体が存在することがあげられる。そこで今後の課題として、環境モデル内の歪みを検出することで、誤差の大きい計測点を除去することが必要となる。誤差の大きい計測点を除去した上で三角網を生成することで、より実環境に矛盾の少ない環境モデルの構築できると考えられる。

参考文献

- [1] J. Gaspar, N. Winters and J. Santos-Victor: "Vision-Based Navigation and Environmental Representations with an Omnidirectional Camera," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.16, No.6, pp.890-898, 2000.
- [2] J. Takiguchi, M. Yoshida, A. Takeya, J. Eino and T. Hashizume: "High Precision Range Estimation from an Omnidirectional Stereo System", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 263-268, 2002.
- [3] 石川 智也, 山澤 一誠, 横矢 直和: "複数の全方位動画からの自由視点画像生成", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005) 講演論文集, pp. 1396-1403, 2005.
- [4] J. Meguro, Y. Amano, T. Hashizume and J. Takiguchi: "Omni-Directional Motion Stereo Vision Based on Accurate GPS/INS Navigation System", Proceedings of 2nd Workshop on Integration of Vision and Inertial Sensors, 2005.
- [5] R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko: "Estimation of Camera Motion with Feature Flow Model for 3D Environment Modeling by Using Omni-Directional Camera", Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3089-3094, 2009.
- [6] J. Y. Bouguet: "Pyramidal Implementation of the LucasKanade Feature Tracker Description of the Algorithm", OpenCV, Intel Corporation, 2000.
- [7] A. Nakatsuji, Y. Sugaya, and K. Kanatani: "Optimizing a Triangular Mesh for Shape Reconstruction from Images", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E88-D, No. 10, pp. 2269-2276, 2005.
- [8] 杉本 茂樹, 奥富 正敏: "ステレオ画像からの直接的かつ高速な微小平面 3D サーフェス生成法", 情報処理学会研究報告 CVIM-156-14, pp. 109-116, No.115, pp. 109-116, 2006.
- [9] 保田 和隆, 椋木 雅之, 浅田 尚紀: "大局的幾何学制約を用いた特徴点追跡に基づく画像列からの 3 次元モデル生成", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005) 講演論文集, pp. 159-166, 2005.

瀬織理志: 静岡大学大学院工学研究科修士課程に在籍。全方位カメラを用いた環境モデル生成に関する研究に従事。
川西亮輔: 静岡大学創造科学技術大学院博士課程に在籍。全方位カメラを用いた環境モデル生成に関する研究に従事。
山下淳: 静岡大学工学部機械工学科准教授。コンピュータビジョン, ロボットの知能化に関する研究に従事。
金子透: 静岡大学工学部機械工学科教授。画像処理, コンピュータビジョンの研究に従事。

<http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp>